



■ SCIENCES

PHYSIQUE THÉORIQUE

Chaos amical

Des comportements apparemment désorganisés pourraient être bénéfiques aux êtres vivants et favoriser certaines réactions chimiques

FRANCISCO BICUDO

Publié en janvier 2005

L

es océans contiennent une énorme variété d'organismes microscopiques transportés constamment par les courants marins. Durant son déplacement,

ce riche mélange composé de plancton, d'algues, de bactéries, de protozoaires de crustacés et de mollusques, rencontre certains obstacles comme des îles, des montagnes sous-marines ou même des navires. Ces vastes bancs de plancton, homogènes à l'œil nu, se divisent et contournent ces barrières pour se rejoindre une fois l'obstacle franchit. Dans ce processus ce banc, auparavant compact, subit des distorsions et se transforme en un réseau complexe de filaments très fins sous l'action de tourbillons sous marins à proximité de ces obstacles qui forcent ces organismes à parcourir



Inventivité et art: des formes sinueuses nées de la rigueur mathématique et qui résolvent d'anciens défis de la biologie

des trajectoires complexes et apparemment irrégulières que les physiciens appellent mouvement chaotique, et qui se répètent à chaque nouvel obstacle.

Une équipe de physiciens de l'Université de São Paulo (USP) a étudié de manière détaillée la structure des filaments qui se forment après les obstacles et a constaté que leurs formes, apparemment irrégulières, peuvent être décrites avec précision grâce aux formules mathématiques de la Théorie des Systèmes Dynamiques, plus connue sous le nom de Théorie du Chaos. Cette théorie est déjà appliquée dans l'étude de phénomènes divers comme la fluctuation du marché financier, les incertitudes météorologiques et même le rythme des battements cardiaques. Grâce à la Théorie du Chaos, les physiciens de l'USP ont découvert une réponse possible à une question qui interpelle les biologistes depuis près d'un demi-siècle; le paradoxe de Hutchinson. Pourquoi le plancton est-il formé d'environ 8 mille espèces d'organismes? Selon les théories classiques de la biologie, ce nombre ne devrait pas dépasser une dizaine d'organismes en fonction de leur compétition acérée en termes de ressources naturelles comme l'oxygène, la lumière et les nutriments.

De tels cas indiquent que le chaos ne signifie pas toujours désordre et confusion et qu'il est parfois souhaitable. Selon le physicien Celso Grebogi; "le chaos est bénéfique au banc de plancton qui se disperse dans l'océan car il favorise la survivance d'un plus grand nombre d'espèces". Grebogi, chercheur à l'Institut de Physique de l'USP, est le principal auteur d'une théorie également applicable à des phénomènes autres que la prévision de la prolifération des espèces de plancton. En effet, ce modèle basé sur la

Théorie du Chaos peut également expliquer certains phénomènes biologiques et chimiques, comme la formation de trous dans la couche d'ozone qui entoure la Terre.

Grebogi et son équipe ont mis au point au sein de l'USP, une nouvelle théorie appelée Chaos Actif en collaboration avec des spécialistes de l'Université d'Eötvös en Hongrie. Ils ont ainsi proposé une nouvelle idée indiquant que, dans des situations particulières, cette théorie du chaos peut signifier autre chose qu'un ensemble de formules mathématiques capable de décrire le comportement d'un système qui se modifie avec le temps comme par exemple, la goutte à goutte d'un robinet qui diminue peu à peu. Dans le cas de particules solides diluées dans un fluide, comme le plancton dans l'océan ou des molécules de polluants dans l'atmosphère, le chaos peut avoir un rôle actif et fonctionner comme catalyseur en accélérant des réactions chimiques ou des interactions biologiques, comme cela a été décrit dans le premier article publié par les chercheurs en 1998 dans la revue *Physical Review Letters*. Le chaos agirait de manière identique aux enzymes produits par l'estomac ou par l'intestin qui augmentent la vitesse des réactions, réduisant les aliments en de plus petites particules.

L'exemple des planctons, qui produisent environ la moitié de l'oxygène de la planète, pourrait favoriser la compréhension de l'action catalysatrice du chaos. Il y a toute une organisation cachée derrière ces filaments sinueux formés par ces organismes marins. La structure de ces filaments obéit à des lois mathématiques très précises car chaque filament possède une structure complexe qui se répète à de petites



Au fil des courants marins: des microorganismes de plancton (*ligne noire*) rencontrent un obstacle (*en rouge*), se dispersent en mouvements turbulents et se réorganisent en filaments, favorisant ainsi la coexistence de milliers d'espèces

échelles. Quand on agrandit ces filaments on s'aperçoit qu'il sont formés de filaments plus fins, qui à leur tour sont formés de filaments encore plus fins, c'est la même structure observée dans une plume d'oiseau. C'est ce que les physiciens appellent la structure fractale. Dans ce cas comme dans d'autres, cette structure fractale est due à l'éloignement rapide et intense de particules auparavant très proches sous l'action du mouvement chaotique du fluide qui les transporte.

Extinction atténuée - Grebogi illustre sa théorie grâce à une séquence d'images sur ordinateur qui nous explique comment autant d'espèces différentes de plancton parviennent à coexister, sans que les plus fortes ne détruisent les plus faibles. Quand les filaments se forment, ils séparent les différentes espèces. Des espaces vides sans plancton apparaissent alors entre ces filaments, rendant la compétition moins acérée. Ces espaces démunis de plancton fonctionnent comme une zone d'échappement où se réfugient les espèces les moins adaptées. "Ce type d'organisation permet à toutes les espèces de s'alimenter en lumière et en oxygène malgré la prédominance de certaines espèces", déclare Grebogi.

Quand la population d'un type spécifique de plancton diminue, la zone d'échappement devient proportionnellement plus grande et cette espèce gagne davantage d'espace pour pouvoir

s'étendre. Elle parvient ainsi à se reproduire et à revenir à des niveaux normaux". Alessandro Moura, physicien à l'Institut de Physique de l'USP et membre de l'équipe de Grebogi dans ce projet, déclare qu'"en accélérant la reproduction de ces espèces, le chaos évite l'extinction des plus faibles et favorise la conservation de la diversité".

Les articles les plus récents de ces chercheurs ont été publiés en 2004 dans la revue *Chaos* du mois de mars et dans la revue *Physical Review Letters* du mois d'avril. Cependant, l'idée mettant en corrélation le plancton et la Théorie du Chaos date d'il y a environ dix ans quand Grebogi et ses collaborateurs, lors de discussions avec leurs amis biologistes, ont admis que les interrogations étaient plus nombreuses que les réponses pouvant expliquer l'existence de 8 mille espèces d'animaux et de plantes qui composent le plancton, avec des durées de vie variant entre deux minutes et deux jours. Dans les années 60,

l'anglais George Evelyn Hutchinson a essayé d'expliquer ce paradoxe qui porterait ensuite son nom. Biologiste et spécialiste en écosystèmes aquatiques, il a utilisé comme argument les variations annuelles de température et le cycle été-hiver pour justifier la survivance d'autant d'espèces. Bien qu'ils soient valides, ces arguments semblent être insuffisants.

Grebogi a donc commencé à considérer l'action du chaos comme étant une réponse possible à ces interrogations grâce à certains indices. L'océan est en fait un fluide rempli de particules transportées par les courants marins qui rencontrent de nombreux obstacles. Les théories biologiques supposent à tort que le plancton se répartit de manière homogène sur la surface des océans. Le premier article signé par Grebogi et ses collaborateurs et publié en janvier 1998 dans la revue *Physical Review Letters*, va établir les bases qui résoudraient le paradoxe d'Hutchinson. À cette époque, Grebogi travaillait à l'Université du Maryland aux États-Unis et était déjà reconnu comme une grande autorité en la matière. C'est également en 1998 qu'il a été nommé directeur scientifique à vie de l'Institut Max Planck à Dresde en Allemagne, où il séjourne deux mois par an, pour ses travaux menés sur la Physique des Systèmes Complexes. Trois ans plus tard, en 2001, ce physicien élégant et raffiné, amateur d'opéra (Mozart ou Verdi pour se distraire, et Wagner ou Strauss quand il désire quelque chose de plus stimulant), a été

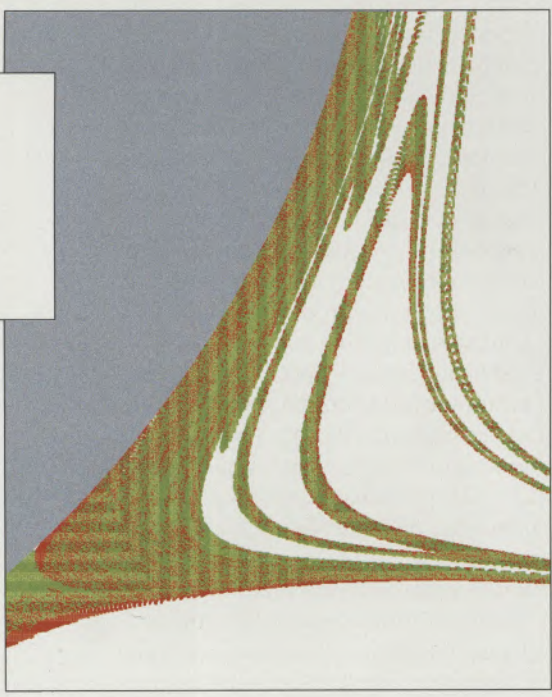
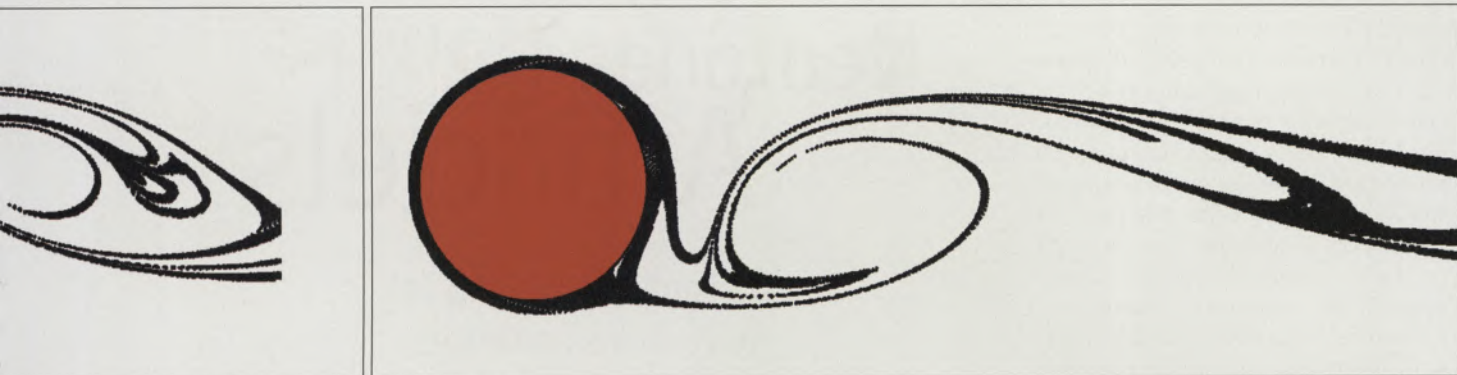
LE PROJET

Dynamique Chaotique

MODALITÉ
Projet Thématique

COORDINATEUR
CELSE GREBOGI - IF/USP

INVESTISSEMENT
682.179,67 réaux



Courbes de la fertilité: après avoir vaincu les obstacles, différentes espèces de microorganismes se mélangent (rouge et vert) en filaments (détail agrandi ci-contre). Les espaces libres favorisent la reproduction des espèces moins abondantes

engagé par l'USP. Cette année, selon les informations transmises par l'Académie Brésilienne de Sciences à partir du Science Citation Index, il est devenu le premier chercheur brésilien à être cité plus de 10 mille fois dans des articles scientifiques.

CFC et ozone - À l'aide d'un autre fichier Grebogi nous montre une image satellite qui démontre que son modèle peut également aider à comprendre le processus de destruction de la couche

d'ozone dans la haute atmosphère terrestre, à près de 20 kilomètres d'altitude. L'ozone est un gaz composé de molécules formées par l'union de trois atomes d'oxygène et fonctionne comme un bouclier, empêchant le passage des rayons ultraviolets, principaux responsables des brûlures du soleil qui provoquent le cancer de la peau. En 1985, des chercheurs du British Antarctic Survey ont, pour la première fois, constaté une réduction de 30% de la couche d'ozone au dessus de l'Antarctique. En août 2003,

la taille de ce trou était de 17,4 millions de kilomètres carrés, plus de deux fois la superficie du Brésil.

Les molécules d'ozone sont détruites au contact du chlore contenu dans certains gaz et appelés Chlorofluorocarbones (CFC) utilisés dans certains appareils de réfrigération. Dans la haute atmosphère, et sous l'action des rayons ultraviolets, le CFC se rompt libérant les atomes de chlore qui peuvent détruire chacun plus de 100 mille molécules d'ozone. C'est à ce moment que la Thé-

orie du Chaos intervient pour expliquer la destruction irrégulière de la couche d'ozone. Si la répartition de CFC était homogène et régulière, les atomes de chlore libérés dans la haute atmosphère auraient un impact sur une zone spécifique de la couche et le trou correspondrait à une zone à peu près circulaire. Les molécules de CFC ont cependant des trajectoires chaotiques et forment des filaments fractals identiques à ceux observés dans le plancton.

La dispersion du gaz en filaments accroît la zone de contact entre les molécules de CFC et celles d'ozone, accélérant la destruction du gaz qui protège les êtres vivants de la radiation ultraviolette du soleil. Selon la règle générale, plus grande sera la surface de contact entre deux composants chimiques, plus grande sera la vitesse de réaction. Il suffit de comparer la rapidité avec laquelle se dissout un bloc de sel dans un verre d'eau par rapport à du sel en poudre. "Cette constatation nous permet d'orienter nos efforts afin de mieux comprendre la destruction de la couche d'ozone", déclare Moura. Ce chaos qui est une source de vie et un élément incontournable pour comprendre certains scénarios confus, peut parfois être indésirable.

Dans certaines applications industrielles comme la production de peintures, les pigments doivent être mélangés de la manière la plus homogène possible. Le problème apparaît quand le mouvement chaotique des mélangeurs de pigments provoque la formation de filaments indésirables car non homogènes. "Si nous sommes capables d'éliminer le chaos, cette théorie pourrait s'appliquer à l'industrie", déclare Grebogi. Son équipe étudie également les fluides turbulents qui ont un comportement aléatoire et extrêmement complexe, comme les tourbillons qui se forment dans un ruisseau ou les turbulences provoquées par le décollage d'un avion. Comme ces turbulences se produisent autant dans l'atmosphère que dans les océans ou dans d'autres situations où les fluides se déplacent à grande vitesse, il s'agit d'un phénomène d'une très grande importance pratique, principalement en matière d'aviation et de navigation. Moura suppose également que "l'effet catalyseur du chaos est peut-être encore plus puissant en ce qui concerne la turbulence des fluides".

Neurones Artificiels

Un ordinateur remplace les cellules nerveuses de crabes et de langoustes

Publié en janvier 2005

L

e crabe bleu reste couvert de glace dans une caisse en polystyrène pendant une demi-heure dans le laboratoire du physicien Reynaldo Daniel Pinto de l'Université de São Paulo (USP). Quand on le retire de la caisse, il est déjà anesthésié par le froid. Sur sa table de travail, le chercheur ouvre la

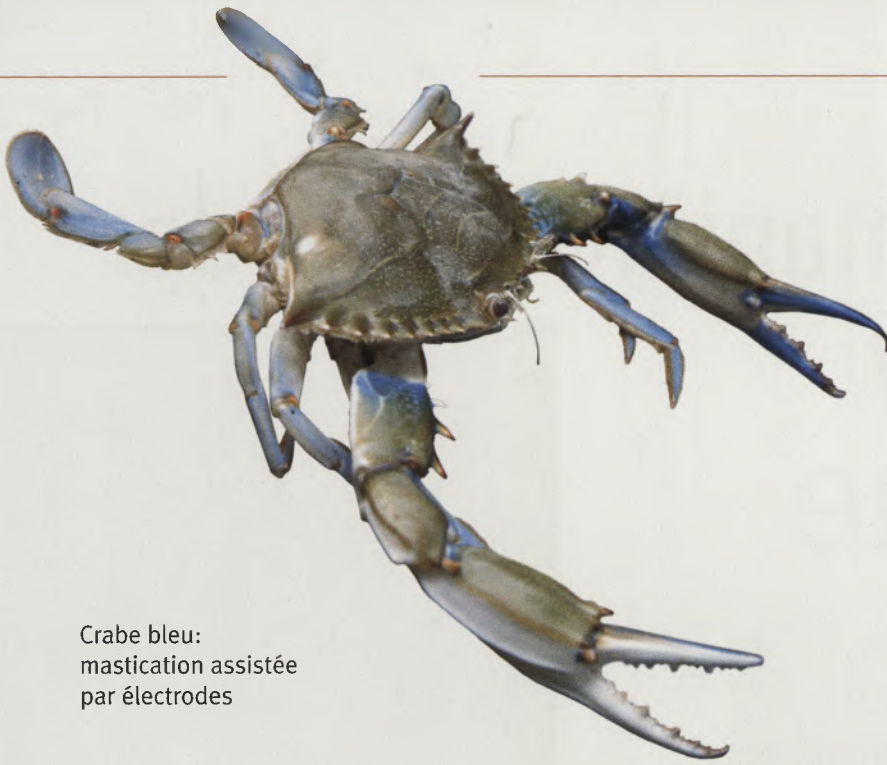
carapace du crustacé (*Callinectes sapidus*) et examine l'intérieur. Entre les yeux se trouve le cerveau et juste en dessous l'estomac.

Daniel Pinto identifie les 30 neurones qui contrôlent le système digestif et la mastication du crabe, les isole avec précaution et commence une opération délicate. À l'aide d'un microscope, il implante dans une de ces cellules nerveuses une électrode en verre remplie d'une solution de chlorate de potassium dont la pointe est plus fine qu'un fil de cheveu. Des fils de cuivre connectent cette électrode à un circuit électronique qui convertit les impulsions nerveuses en chiffres numériques qui seront lus par un ordinateur classique, et qui maintenant jouera un rôle spécifique: remplacer une des cellules et agir comme un neurone artificiel. Voici un crabe bionique.

Dans cette expérience, le physicien évalue la capacité d'exécution de l'ordinateur à reproduire la même fonction qu'un neurone appelé gâchette antérieure, une des 14 cellules nerveuses composant le circuit pylorique qui commande le transport des aliments de l'estomac vers l'intestin. Si un de ces neurones est détruit ou si la communication avec les centres nerveux du cerveau est interrompue, les autres neurones commencent à émettre des signaux électriques désordonnés et la digestion s'arrête. C'est à ce moment là que l'ordinateur dûment programmé entre en jeu en se transformant en neurone virtuel qui agit comme l'original, tel un simulateur cardiaque.

Une autre électrode plantée dans le neurone envoie un courant d'ions (particules atomiques chargées électroniquement) de potassium et de chlore qui migrent vers la cellule. On recrée ainsi dans la cellule l'environnement chimique nécessaire à la transmission de l'impulsion nerveuse. Aussitôt stimulée, la cellule nerveuse du crabe réagit et transmet l'information aux neurones. En moins de deux secondes, un message arrive à l'estomac et les mouvements musculaires poussent l'aliment vers l'intestin.

Avec cette même technique, il est possible de savoir comment différents types de synapses (connections entre les neurones) agissent dans la saisie d'information, comme cela est décrit dans un article publié en juin dans la revue *Neurosciences*. "C'est un jeu de questions et de réponses où nous essayons de



Crabe bleu:
mastication assistée
par électrodes

comprendre le langage utilisé par les neurones”, déclare Daniel Pinto. L'étude de ces neurones artificiels est un des développements du Projet Thématique coordonné par le physicien Iberê Luiz Caldas et qui a déjà débouché sur la création d'un modèle de prévision du comportement des bourses financières (voir *Pesquisa FAPESP n° 65*).

Si les physiiciens ne comprennent pas encore le langage des neurones, ils ont réussi à déchiffrer certaines de leurs réponses. Dans une autre expérience, l'équipe de l'USP a stimulé le fonctionnement d'un groupe de neurones qui fait partie d'un ensemble de 30 cellules nerveuses du système nerveux lié à la mastication et à la digestion du crabe bleu, espèce rencontrée sur le littoral brésilien et appréciée pour sa chair savoureuse. Onze de ces 30 neurones, liés au contrôle de la mastication, transmettent les informations à un rythme beaucoup plus lent que ceux du circuit pylorique. Quand la communication entre ces cellules et le ganglion central est interrompue, tout le groupe de neurone s'arrête de fonctionner: les muscles qui font bouger les dents, situés dans l'estomac du crabe, se paralysent. Cette fois l'ordinateur n'agit plus uniquement tel un simulateur cardiaque qui envoie des signaux électriques à un rythme constant: il reçoit et interprète également les signaux émis par les cellules nerveuses avant d'envoyer une autre impulsion électrique.

Les quatre équations - L'ordinateur dûment programmé envoie des stimulus électriques vers un neurone spécifique du circuit débranché (le gastrique latéral) et redevient silencieux. Quand il est provoqué, le gastrique latéral réagit par un renvoi de l'impulsion électrique au neurone, avant de redevenir inactif. On crée ainsi un cycle de stimulus, de renvois et silences qui affecte les autres neurones du groupe. Finalement, le rythme de fonctionnement du circuit est récupéré et la mastication reprend son cours. “La simple présence du renvoi et le cycle de réponses et d'absences de l'activité qu'il vient de créer paraissent être suffisant pour que le circuit redevienne normal, sans avoir besoin d'un neurone simulateur”, déclare Daniel Pinto.

Il n'aurait jamais imaginé qu'il allait étudier le comportement des neurones. Pendant son doctorat, il a travaillé sur la Théorie du Chaos et a expliqué le

comportement des gouttes d'eau qui gouttent d'un robinet à moitié fermé. L'étude des équations qui essayent de prévoir le développement de phénomènes complexes a été fondamentale pour donner de l'élan à sa carrière. Durant son post-doctorat à l'Université de Californie, à San Diego, aux États-Unis, Daniel Pinto a appliqué la physique à l'étude de l'activité des neurones d'un autre crustacé: la langouste épineuse californiennes (*Panulirus interruptus*), dont la taille peut atteindre 40 centimètres. C'est à ce moment là, qu'il a développé le programme permettant à un ordinateur de se comporter comme un neurone.

Daniel Pinto a utilisé un modèle mathématique de neurone qui fonctionne avec trois équations de la Théorie du Chaos et en a rajouté une quatrième. Il a pu ainsi construire un circuit électronique capable d'émettre des signaux électriques et qui agit comme un neurone artificiel. Mais il y avait des limitations. Quand il voulait modifier le message envoyé aux cellules biologiques, il devait repartir de zéro et reconstruire un autre circuit. Grâce à l'augmentation de la vitesse et de la mémoire des ordinateurs, il a créé un programme basé sur ces quatre équations permettant à la machine d'agir comme un neurone numérique. Maintenant il parvient à altérer les variables des équations et faire qu'une même machine puisse envoyer des ordres différents aux neurones originaux.

Ce programme devrait favoriser la création de prothèses anatomiques contenant des neurones artificiels. Il peut également, quand il sera amélioré, être utilisé dans le traitement de personnes paralysées des bras et des jambes. Mais nous n'y sommes pas encore. Le physicien Antonio Carlos Roque da Silva Filho, de l'USP à Ribeirão Preto, mélange optimisme et prudence quand il explique le stade actuel des recherches dans ce domaine. “Durant ces trois dernières décennies, nous avons produit une grande quantité d'information sur le fonctionnement du cerveau humain” déclare-t-il. L'enjeu actuel est de construire des modèles mathématiques et informatisés qui interpréteront les données produites. Il rajoute également que “des phénomènes liés à la perception et aux émotions, comme la mémoire et la conscience sont encore complètement méconnus”.

LE PROJET

Dynamique Non Linéaire

MODALITÉ

Projet Thématique

COORDINATEUR

IBERÊ LUIZ CALDAS – Institut de Physique de l'USP

INVESTISSEMENT

476.477,50 réaux